

О ВЛИЯНИИ ПЛАЗМЕННОЙ ЧАСТОТЫ НА СПЛОШНОЙ СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА В ВОДЕ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ

О.А. Федорович

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина

E-mail: oafedorovich@kinr.kiev.ua; interdep@kinr.kiev.ua

Приведены результаты экспериментальных исследований излучения сплошного спектра неидеальной плазмы в видимом диапазоне, полученной при сильноточных разрядах в воде, инициированных взрывами проводников. Энергия конденсаторной батареи ёмкостью 14,6 мкФ достигала 10 кДж при 37 кВ, период разряда 15,5 мкс, ток разряда ≤ 200 кА, длина разрядного промежутка 10...100 мм. Показано, что при взрыве в воде проводников из вольфрама диаметром 320 мкм и более на сплошном спектре в видимом диапазоне наблюдается самообращённый провал интенсивности в 4-10 раз с шириной ± 40 нм. По мере релаксации плазмы происходит перемещение провала интенсивности из фиолетовой в красную область спектра. Обнаруженные провалы интенсивности идентифицируются с резким уменьшением излучения на плазменной частоте и экранировкой излучения из канала на частотах, меньших плазменной. Делается оценка концентраций электронов по плазменной частоте, а их величины достигают значений $(2...7) \cdot 10^{21}$ см⁻³. Измерения температуры плазменного канала следует проводить на длинах волн $\lambda < \lambda_{pl}$.

ВВЕДЕНИЕ

Фундаментальные исследования излучения вещества в критических состояниях — один из важных вопросов в современной физике плазмы. Недостаточность информации в этой области связана с проблемами получения вещества в таком состоянии, очень короткими временами её существования и сложностью измерений интенсивности излучения из-за отсутствия соответствующего оборудования для исследований. Необходимость таких исследований связана с реализацией ряда энергетических и технических проектов, рабочим телом в которых может являться неидеальная плазма (НП).

Одним из таких проектов является возможность использования неидеальной плазмы в решении проблемы термоядерного синтеза. В 1961 г. Е.С. Боро-вик предложил идею использования запыряния излучения в неидеальной плазме при сверхвысоких давлениях для снижения уровня температур, при которых возможны термоядерные реакции [1]. В ряде работ, проведенных в ХФТИ и систематизированных в [2 и др.], опубликованы результаты исследований излучения в аргоне, гелии и водороде, при которых наблюдалось уменьшение поверхностной яркости импульсных разрядов в 30-50 раз при увеличении давления от 100 до 600 атм. По мнению автора работы [2] это явление связано с нарастающей с ростом давления ролью процессов поглощения света в периферийных областях импульсных разрядов в газах. При этом были получены концентрации заряженных частиц $(4...5) \cdot 10^{19}$ см⁻³ при температурах $(2...3) \cdot 10^4$ К [2] и параметре неидеальности $\gamma = 0,25...0,3$.

Представляют большой интерес исследования спектров излучения неидеальной плазмы при более высоких значениях γ , так как здесь предполагается существенное влияние на них эффектов неидеальности, предсказанных в ряде теоретических работ [3-5].

Один из последних обзоров результатов по

исследованиям излучения неидеальной плазмы приведен в работе [6].

Настоящая работа посвящена экспериментальным исследованиям излучения сплошного спектра неидеальной плазмы импульсных разрядов в воде (ИРВ) в видимом диапазоне при инициировании разрядов взрывающимися проводниками. Следует также отметить основное отличие разрядов в воде и в газах: при разрядах в воде ударная волна отходит по воде не создавая ярко светящегося фронта, как это происходит при разрядах в газах. Поэтому в газах, как правило, проводят измерения параметров плазмы за отраженной ударной волной. При разрядах в воде этого не требуется. Здесь существует очень тонкий переходной слой между плазменным каналом и водой, который не должен очень сильно влиять на измерения параметров плазмы при разрядах в воде.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Исследования излучения неидеальной плазмы ИРВ при инициировании их с помощью взрывающихся проволочек проводились при импульсном разряде конденсаторной батареи ёмкостью 14,6 мкФ с запасаемой энергией $65...10^4$ Дж при изменении напряжения заряда от 3 до 37 кВ. Период разряда составлял 15,5 мкс, а максимальные токи в разрядах достигали 200 кА за ~ 4 мкс. Длина разрядного промежутка изменялась от 10 до 100 мм.

Для получения необходимой информации была проведена модернизация аппаратуры для исследований быстропротекающих процессов, что дало возможность провести калибровку высокочувствительных аэрофотоплёнок по интенсивности на два порядка и измерять температуры от $40 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^3$ К [7,8]. При обработке спектров использовалась методика гомохромного фотометрирования, имеющая точность определения интенсивности не хуже 10%. Для калибровки плёнки использовался эталонный источник ЭВ-45

[12]. Это позволило провести исследования спектров излучения НП ИРВ с примесями металлов, получить спектральное распределение излучения в видимом диапазоне спектра и исследовать его изменения во времени по мере распада неидеальной плазмы и уменьшения концентрации электронов. Обнаружен ряд особенностей в спектрах излучения НП.

Как отмечалось в работе [9], излучение сплошного спектра плазмы ИРВ существенно отличается от излучения абсолютно черного тела. С добавкой примесей металлов в водородно-кислородную плазму резко увеличивается концентрация электронов НП, а, следовательно, и степень неидеальности плазмы. При этом распределение спектра излучения из плавного, но неравновесного распределения интенсивности (I) преобразуется в более сложное.

На Рис.1 приведено изменение во времени яркостной температуры плазменного канала ИРВ в зависимости от диаметра инициирующего проводника. Следует отметить, что основной вклад энергии в канал происходит на протяжении 20...30 мкс, а далее происходит релаксационный распад плазмы без подкачки энергии. Как видно на Рис.1, чем меньше диаметр инициирующего разряд проводника, тем до более высоких температур происходит нагрев плазмы, но быстрее происходит и уменьшение температуры плазменного канала. Характерной особенностью излучения канала ИРВ является практически отсутствие излучения при инициировании разряда проводником из вольфрама диаметром 320 мкм и более в начальные моменты времени, когда ток в разряде достигает за 6 мкс величины $\sim 100...200$ кА, а давление $\sim (3...12) \cdot 10^3$ атм.

Расчеты давления в плазменном канале проводились по модели квазинесжимаемой жидкости, при которой необходимо учитывать радиус канала, скорость и ускорение границы плазменного канала, а также радиус фронта ударной волны. Все эти данные были получены благодаря использованию камеры ВФУ-1 в режиме фотохронографа с подсветкой канала от постороннего источника излучения и привязкой пространственно-временных характеристик к электрическим. Расчеты давления проводились до 150...200 мкс, а его значения в процессе релаксации плазмы изменялись от 12...15 тыс. атмосфер до сотни атмосфер и ниже.

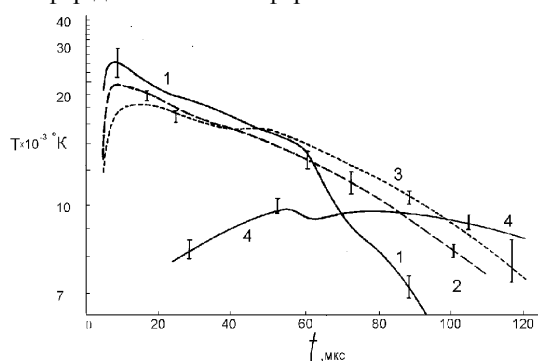


Рис.1. Зависимость яркостной температуры плазменного канала от времени. Вольфрам, $U=20$ кВ, $\lambda=463$ нм: 1 - $d=20$ мкм, 2 - $d=75$ мкм, 3 - $d=160$ мкм, 4 - $d=320$ мкм

Рассмотрим более подробно спектральное распределение сплошного спектра в разные моменты времени по мере распада плазмы.

Спектральные распределения излучения ИРВ при инициировании разряда ВП из вольфрама диаметром 320 мкм имеют существенные отличия от приведенных в работе [8]. При "взрыве" перегретого проводника из вольфрама (а о перегреве говорят полученные яркостные температуры порядка 11×10^3 К, которые удается зарегистрировать при излучении паров) далее при повышении давления, интенсивность излучения поверхности плазмы резко уменьшается, несмотря на интенсивный ввод энергии в канал и отсутствие "паузы тока". И только на поздних стадиях разряда интенсивность становится достаточной для регистрации на пленке. А в моменты ввода энергии в канал и высокого давления в нем интенсивность свечения очень малая и соответствует яркостным температурам $T_{я} < 5 \times 10^3$ К (появляются отдельные точки интенсивного излучения). Распределения интенсивностей, полученные в этом случае (при $U_0 = 20$ кВ), приведены на Рис.2-5.

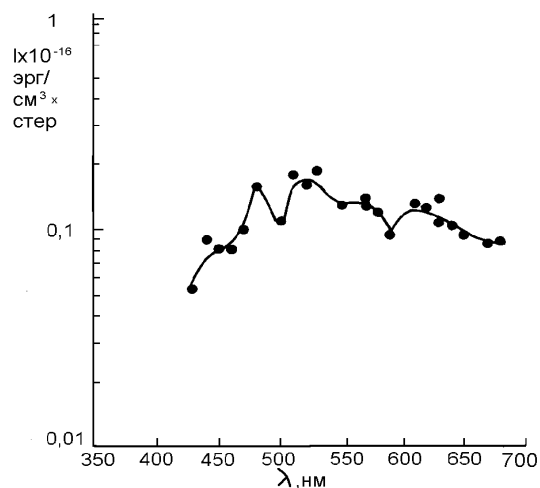


Рис.2 Зависимость интенсивности излучения от длины волны.

Вольфрам, $d=320$ мкм, $U=20$ кВ, $l=40$ мм, $t=(23 \pm 2)$ мкс ($N_e = 5 \cdot 10^{21}$ см⁻³)

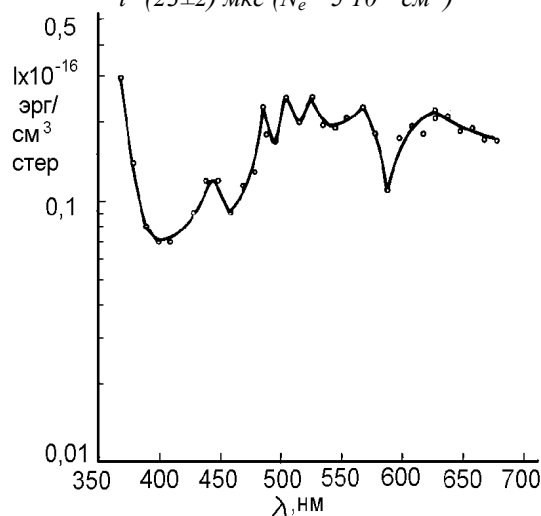


Рис.3. Зависимость интенсивности излучения от длины волны.

Вольфрам, $d=320$ мкм, $U=20$ кВ, $l=40$ мм,
 $t=(53\pm 2)$ мкс ($N_e=4, 5\times 10^{21}$ см $^{-3}$)

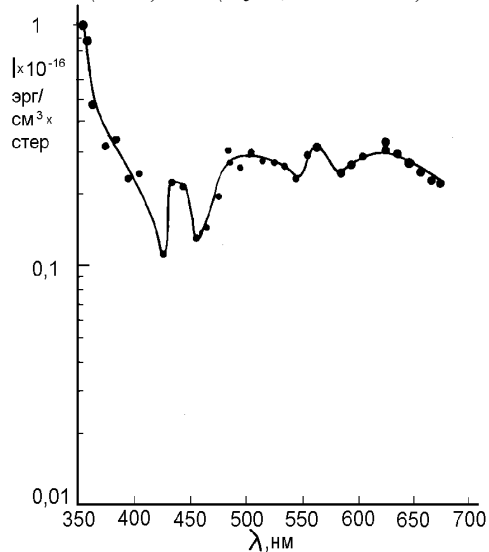


Рис.4. Зависимость интенсивности излучения от длины волны. Вольфрам, $d=320$ мкм, $U=20$ кВ, $l=40$ мм, $t=(73\pm 2)$ мкс ($N_e= 3,5\times 10^{21}$ см $^{-3}$)

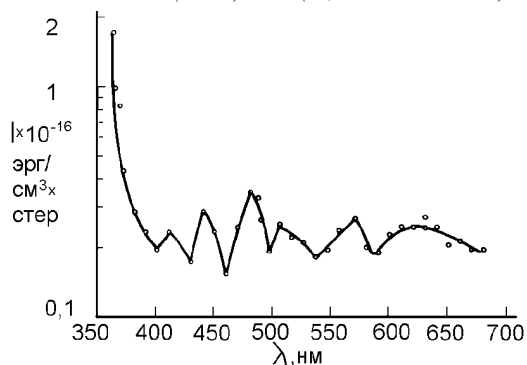


Рис.5. Зависимость интенсивности излучения от длины волны. Вольфрам, $d=320$ мкм, $U=20$ кВ, $l=40$ мм, $t=(143\pm 2)$ мкс

Выбрано несколько моментов времени, чтобы показать динамику развития спектральных распределений. На начальной стадии разряда, в некоторые моменты времени, удается обработать спектрограммы и получить распределение интенсивности спектра излучения неидеальной водородно-кислородной плазмы с примесью $5,1\times 10^{19}$ ат./см (атомов на 1 см длины канала) атомов вольфрама. Если предположить равномерное распределение по сечению канала атомов металла (самая грубая модель), то концентрация атомов примеси вольфрама уменьшается от $(6,09\dots 6,37)\cdot 10^{22}$ см $^{-3}$ в самой взрывающейся проволочке до $1,1\cdot 10^{20}$ см $^{-3}$ за 10 мкс и $1,4\cdot 10^{19}$ см $^{-3}$ за 50 мкс. Общая концентрация частиц в плазме по грубым оценкам должна быть значительно больше, а примеси составляют не более 20% от общей концентрации частиц в плазме. При оценках N^* бралась яркостная температура плазменного канала и уравнение состояния идеального газа. Как следует из приведенных рисунков, в поздние моменты времени на непрерывный спектр накладывается много сильно уширенных линий поглощения вольфрама. Получить достоверные распределения I в сплошном спектре

здесь трудно, так как необходима тщательная обработка I в области каждой уширенной линии поглощения вольфрама и других примесей (Na, Ca и т.д.).

Отметим, что этот эффект достаточно хорошо воспроизводится, так как съемка всего спектра от 350 до 700 нм проводилась за шесть раз, а ошибка в измерениях интенсивности от разряда к разряду не превышала 5%, что хорошо видно на Рис.2-5. Здесь видны измерения интенсивности, проведенные при двух разных разрядах на одной и той же длине волны, значения которых практически не отличаются.

На начальной стадии разряда в фиолетовой области спектра наблюдаются широкие провалы интенсивности ± 50 нм. С течением времени они перемещаются в область больших длин волн. По-видимому, провал интенсивности в 4 раза по сравнению с соседними участками спектра происходит на плазменной частоте. Это предположение возникает из-за известного факта, что в области длин волн вблизи плазменных, оптические свойства плазмы сильно меняются: для $\lambda \geq \lambda_{pl}$ коэффициент отражения плазмы приближается к единице, а излучательная способность быстро падает, и, следовательно, интенсивность также сильно уменьшается [9]. В результате этого эффекта наблюдается сильная экранировка излучения в этой области длин волн, а потери на излучение в этой области спектра существенно уменьшаются. Аналогичный эффект наблюдался и в работе [2] на импульсных дугах высокого давления, где при повышении давления уменьшалась интенсивность излучения поверхности плазменного канала. Характерной особенностью этого эффекта является вполне естественное перемещение провала в интенсивности излучения в красную область при уменьшении N_e , а на кривых зависимости интенсивности от времени на определенной длине волны выражается в перегибе и увеличении интенсивности (см. Рис.1). Еще одним фактом, подтверждающим это предположение, является увеличение интенсивности в фиолетовой области спектра по сравнению с интенсивностью в области $\lambda > \lambda_{pl}$, что является вполне закономерным. Область плазменной частоты выражена в виде широкого провала с максимумом в центральной области, причем интенсивность в максимуме не превышает I излучения в соседних областях спектра, расположенных за участком плазменной частоты. Самый большой коэффициент отражения в данном случае наблюдается именно в области ± 50 нм от плазменной частоты. Характерно, что при измерениях временного хода интенсивности на той же длине волны, в случае уменьшения количества примесей металла, перегиб в интенсивности наблюдается во все более ранние моменты времени, а экранировка излучения при этом уменьшается. Следовательно, интенсивность излучения увеличивается, как и скорость рекомбинации: распад плазмы происходит быстрее. Но присутствие плазменной частоты, наблюдаемое

экспериментально, является очень важным моментом, так как может объяснить многие моменты в поведении неидеальной плазмы. В первую очередь, наличие плазменной частоты позволяет с достаточно высокой точностью определить концентрацию электронов в канале по формуле [9]:

$$\omega_{i\tilde{e}} = \left(\frac{4\pi\tilde{a}^2 \times N_e}{m_e} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

$$v_{i\tilde{e}} = \frac{\omega_{i\tilde{e}}}{2\pi},$$

где e – заряд электрона; N_e – концентрация электронов; m_e – масса электронов.

$$v_{i\tilde{e}} \approx 10^4 \sqrt{N_e} \text{ (Гц)}, \quad (2)$$

где N_e – число заряженных частиц в 1 см^3 .

Результаты вычислений N_e приведены ниже. На 23 мкс концентрация электронов составляет не ниже $5 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$, на 53 мкс – $N_e = 4,5 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$, на 73 мкс – $3,5 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$. Следовательно, за первые 20 мкс концентрация электронов уменьшилась на 10%, хотя подкачка энергии из разрядного контура в плазму не осуществляется, а за последующие 20 мкс N_e уменьшается на 32%, что свидетельствует об очень низкой скорости рекомбинации плотной неидеальной плазмы.

Зная N_e и температуру, можно определить степень неидеальности плазмы, но температуру надо определять по интенсивности в области спектра с $\lambda < \lambda_{\text{пр}}$. Происходит очень медленное смещение максимума отражения плазмы в красную область, что свидетельствует о малой скорости рекомбинации, так как распад плазмы происходит очень медленно. Это подтверждает предсказываемое теоретически [10] уменьшение скорости рекомбинации в неидеальной плазме из-за пропадания верхних уровней атомов нерезализации под воздействием микрополей неидеальной плазмы [13], на которых не может происходить захват электронов. Это выражается в исчезновении в начале разряда всех линий поглощения, а с течением времени появления линий со все более высокими потенциалами возбуждения, по мере уменьшения концентрации электронов. Из-за отсутствия уровней линий поглощения не может происходить и фотоионизация, т.е. не происходит фотоионизационное поглощение, что приводит к уменьшению коэффициента поглощения в плазме. Аналогичный эффект наблюдался при исследовании неидеальной аргоновой плазмы [11] при $N_e > 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Пропадание механизма фотоионизации приводит и к пропаданию обратного механизма – фоторекомбинации. Непонятен и механизм выноса атомов металла на поверхность канала. Наличие коэффициента отражения, близкого к единице, на длинах волн $\lambda \geq \lambda_{\text{пр}}$, приводит к запиранию излучения из плазмы, уменьшению потерь на излучение и затягиванию рекомбинации плазмы при увеличении количества атомов примесей металлов в канале.

Отметим, что самую интенсивную линию водорода серии Бальмера H_α ($\lambda=656,3 \text{ нм}$) при обработке спектрограмм выявить не удалось.

Спектральное распределение интенсивности сплошного спектра ($t=53 \text{ мкс}$) в области 500...700 нм мало отличается от распределения I АЧТ при $12 \cdot 10^3 \text{ К}$. В данном случае наблюдается обратный эффект: интенсивность излучения уменьшается при уменьшении длины волн, что может быть связано с большим количеством линий вольфрама в коротковолновой области, часть которых начинает появляться в спектре поглощения. В припороговой области спектра бальмеровской серии наблюдается некоторый подъем интенсивности излучения, связанный с уменьшением коэффициента отражения на $\lambda < \lambda_{\text{пр}}$. Спектральное распределение I на 143 мкс представляет собой сложную картину, так как в этот момент времени уже появилось большое количество линий вольфрама. Провалы интенсивностей сплошного спектра объясняются поглощением в линиях вольфрама, хотя распределение сплошного спектра в среднем близко к излучению АЧТ при $T=12 \cdot 10^3 \text{ К}$. “Аномалия” в области спектра 380...480 нм исчезает, перемещаясь в красную область спектра.

ВЫВОДЫ

Спектральное распределение излучения плазмы ИРВ с добавкой в разряд до 20% примесей атомов металла имеет явно выраженный провал в интенсивности излучения шириной $\pm 50 \text{ нм}$ фиолетовой части спектра, отождествляемый с плазменной частотой. Провал в интенсивности излучения по мере уменьшения γ смещается в красную область, а на временном ходе интенсивности излучения наблюдается перегиб интенсивности, и тем позже, чем больше примесей металла в канале. Интенсивность излучения в области спектра с $\lambda < \lambda_{\text{пр}}$, существенно превышает I в области с $\lambda \geq \lambda_{\text{пр}}$.

По плазменной частоте определена концентрация электронов в канале. Значение N_e , полученное по плазменной частоте, неплохо согласуется со значениями N_e , полученными по формуле, приведенной в [5], из ДЕ “оптической щели” в спектре поглощения.

В сильно неидеальной плазме происходит уменьшение скорости рекомбинации плазмы, что следует из очень малого спада концентрации плазмы во времени. Измерять T можно только в области спектра с $\lambda < \lambda_{\text{пр}}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е.С. Боровик. *Магнитные ловушки*. Киев, 1969, в.4, с.53.
2. Р.В. Митин. Исследование дуговых высокочастотных и импульсных сильноточных газовых разрядов при высоких (до 100 атм) и сверхвысоких (до 2000 атм.) давлениях: *Автореф. ... докт. ф-м наук*. Харьков, 1973, 26с.
3. Г.А. Кобзев, Ю.К. Куриленков, Г.Э. Норман. К теории оптических свойств неидеальной плазмы // *ТВТ*. 1977, т.15, №1, с.453-460.
4. Г.Э. Норман. Непрерывные спектры излучения (поглощения) неидеальной плазмы // *ТВТ*. 1979,

- т.17, №3, с.453-460.
5. В.С. Воробьёв, А.Л. Хомкин. Влияние флуктуаций потенциала в плазме на заселённость высоковозбуждённых состояний атомов // *Физика плазмы*. 1982, т.8, №6, с.1274-1284.
 6. А.С. Каклюгин, Г.Э. Норман. Термодинамические, оптические и транспортные свойства низкотемпературной плазмы // *Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том / Под ред. акад. В.Е. Фортова*. М.: „Наука“, МАИК, «Наука/Интерпериодика», 2000, раздел III, с.402-408.
 7. В.В. Матвиенко, А.Ю. Попов, О.А. Федорович. К вопросу об использовании линий водорода серии Бальмера H_{α} и H_{β} для изучения параметров плазмы импульсного разряда в воде // *Теория, эксперимент, практика разрядно-импульсной технологии*. Киев: „Наукова думка“, 1987, с.14-22.
 8. Л.Л. Пасечник, П.Д. Старчик, О.А. Федорович. Временная эволюция спектров излучения импульсных разрядов в воде // *Там же*. С.6-9.
 9. Л.Л. Пасечник, П.Д. Старчик, О.А. Федорович. Исследование непрерывного излучения импульсного разряда в диапазоне 400...700 нм // *Тезисы докладов 6-й Всесоюзной. конф. по физике низкотемпературной плазмы*. 1983, ч.1, с.501-503.
 10. *Методы исследования плазмы / Под ред. В. Лохте-Хольтгревена*. М.: «Мир», 1971, 552 с.
 11. Ю.К. Куриленков. О влиянии неидеальности на коэффициент рекомбинации плотной плазмы // *ТВТ*. 1980, т.18, №6, с.1312-1319.
 12. В.Е. Беспалов, В.К. Грязнов, В.Е. Фортов. Излучение ударно-сжатой плазмы аргона высокого давления // *ЖЭТФ*. 1979, 76, №1, с.140-147.
 13. А.Н. Демидов, Н.Н. Огурцова, И.В. Подмошенский. Импульсный источник света с излучением, подобным излучению абсолютно чёрного тела при температуре 40000 К // *Оптико-механическая промышленность*. 1960, №1, с.2-7.
 14. В.М. Коновал, А.Ю. Попов, О.А. Федорович. Динамика спектра излучения неидеальной водородно-кислородной плазмы в диапазоне 350...700 нм // *Тезисы докладов 7-й Всесоюзной конф. по физике низкотемпературной плазмы*. Ташкент: «ФАН», 1987, ч.2, с.41-42.

Статья поступила в редакцию 05.06.2008 г.

ABOUT INFLUENCE OF PLASMA FREQUENCY ON A CONTINUOUS SPECTRUM OF RADIATION OF NONIDEAL PLASMA OF THE PULSE DISCHARGE IN WATER IN A SEEN RANGE

O.A. Fedorovich

In work results of experimental researches of radiation of a continuous spectrum of nonideal plasma in the seen range, received are resulted at power discharges in the water, initiated by the conductors explosions. Energy of the condenser battery in capacity 14,6 μF reached 10 kJ at 37 kV, the period of discharge 15,5 μs a current of discharge ≤ 200 kA, length of a discharge interval of 10...100 mm. It is shown, that at explosion in water of conductors from tungsten in diameter 320 microns and more on a continuous spectrum in a seen range are observed the self-inverted failure of intensity at 4-10 times with a width ± 40 nanometer. In process of a relaxation of plasma there is a moving a failure of intensity from violet in red area of a spectrum. The found out failures of intensity are identified with sharp reduction of radiation by plasma frequency and screen of radiations from the channel on frequencies, smaller then plasma frequencies. The estimation of concentration electrons on plasma frequency is made, and their sizes reach values $(2...7) \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$. Measurements of temperature of the plasma channel should be carried out on lengths of waves $\lambda < \lambda_{\text{pl}}$.

ПРО ВПЛИВ ПЛАЗМОВОЇ ЧАСТОТИ НА СУЦІЛЬНИЙ СПЕКТР ВИПРОМІНЮВАННЯ НЕІДЕАЛЬНОЇ ПЛАЗМИ ІМПУЛЬСНОГО РОЗРЯДУ В ВОДІ В ВИДИМОМУ ДІАПАЗОНІ

O.A. Федорович

Приводяться результати експериментальних досліджень випромінювання суцільного спектру неідеальної плазми в видимому діапазоні, одержаної при сильнострумових розрядах в воді, ініційованих вибухами провідників. Енергія конденсаторної батареї ємністю 14,6 мкФ досягала 10 кДж при 37 кВ, період розряду 15,5 мкс, струм в розряді ≤ 200 кА, довжина розрядного проміжку 10...100 мм. Показано, що при вибухах в воді провідників з вольфраму діаметром 320 мкм і більше на суцільному спектрі в видимому діапазоні спостерігається самообернений провал інтенсивності в 4-10 разів з шириною ± 40 нм. По мірі релаксації плазми проходить переміщення провалу інтенсивності з фіолетової в червону область спектру. Провали інтенсивності ідентифікуються з різким зменшенням випромінювання на плазмовій частоті з екрануванням випромінювання з каналу на частотах, менших плазмової. Проводиться оцінка концентрацій електронів по плазмовій частоті, а їх величини досягають значень $(2...7) \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$. Вимірювання температури плазмового каналу слід проводити на довжинах хвиль $\lambda < \lambda_{\text{pl}}$.